

文章编号: 1001-3806(2008)06-0655-04

## 偏振模色散补偿的 2 种反馈控制信号特性比较

龙 海<sup>1</sup>, 徐英鹏<sup>2</sup>, 陈 林<sup>2\*</sup>

(1. 湖南人文科技学院 计算机科学技术系, 娄底 417000; 2. 湖南大学 计算机与通信学院, 长沙 410082)

**摘要:** 为了研究光纤通信系统中存在高阶偏振模色散时, 采用偏振度和电带宽作反馈信号, 偏振模色散的补偿效果, 采用数值模拟方法比较了两种常用的反馈控制信号对偏振模色散性能的影响, 由模拟结果可知, 从性能上讲, 两种反馈信号都随 1 阶偏振模色散变化而具有线性变化, 当系统中有高阶偏振模色散时, 二者均不具有线性的变化, 但偏振度的性能要优于电带宽信号。结果表明, 这对偏振模色散补偿具有一定的指导意义。

**关键词:** 光通信; 偏振模色散; 反馈信号; 自适应补偿

**中图分类号:** TN929.11; O436.3 **文献标识码:** A

## Performance comparison between two feedback signals for PMD compensation

LONG Hai<sup>1</sup>, XU Yingpeng<sup>2</sup>, CHEN Lin<sup>2\*</sup>

(1. Department of Computer, Hunan Institute of Humanities Science and Technology, Loudi 417000, China; 2. School of Computer and Communication, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract** In order to study the compensation effect of the polarization mode dispersion (PMD) when the degree of polarization and electrical power are employed as feedback signals in a fibre optic communication system, the performance between two feedback signals are compared by means of numerical simulation. The simulation results show that when high order PMD is not considered, two signals are linearly changed with differential group delay (DGD). But when the high order PMD is considered, two signals are not linearly correlative with DGD. On the other hand, the performance of degree of polarization is better than that of electrical power. These results will be useful for adaptive PMD compensation.

**Key words** optical communication; polarization mode dispersion; feedback signal; adaptive compensation

### 引 言

偏振模色散 (polarization mode dispersion, PMD) 已成为限制高速光纤通信系统速率及传输距离的主要因素之一<sup>[1]</sup>。近年来人们对偏振模色散及其补偿进行了大量的研究<sup>[2-5]</sup>, 并提出了多种自适应 PMD 补偿方案。在 PMD 补偿技术中, PMD 反馈控制单元起到了减小 PMD 对系统性能影响的关键性作用。为了将这种影响变为控制单元能够识别的形式 (电信号), 需要从传输信号中提取反馈信号。评价反馈信号优劣的标准有<sup>[4,5]</sup>: (1) 灵敏度; (2) 与误码率 (bit error rate, BER) 的相关性; (3) 响应时间; (4) 与码速率无关, 便于系统的升级。

现行的反馈信号中, 基本有几种: (1) 偏振度 (degree of polarization, DOP)<sup>[6-7]</sup>; (2) 电谱宽度<sup>[8]</sup>; (3) 总的

电功率; (4) 对误码率的预测。作者重点比较了 DOP 和电谱宽度这两种反馈信号的形式特性。本文中的结果将对偏振模色散自适应补偿起到一定的指导作用。

### 1 电带宽作反馈信号

利用电带宽作反馈信号是从电域的角度实现信号提取, 通常的做法是对接收下来的电信号频谱的某一个或几个特定的频率分量测量其强度的大小, 以反映在 PMD 影响下带宽的变化。

#### 1.1 电带宽作反馈信号的原理

考虑 1 阶 PMD 的存在对电频谱的影响, 假设  $F(t)$  是没有 PMD 情况下光强随时间的变化, 在给出 PMD 的情况下, 假设差分群时延 (differential group delay, DGD) 为  $\Delta\tau$ , 光强在两个主态旋转速率轴上的分束比为  $\gamma$ ,  $\omega$  为角频率,  $f = \omega/2\pi$ , 光纤输出端光强随时间的变化为  $\gamma F(t - \Delta\tau) + (1 - \gamma)F(t)$ , 对于平方检波的光接收机, 接收的电信号的电场强度正比于这个值, 电频谱的平方作为电功率谱的强度, 这样基带功率谱  $P(f)$  由下式表示<sup>[8]</sup>:

$$P(f) = \left| \int \gamma F(t - \Delta\tau) + (1 - \gamma)F(t) \exp(j\omega t) dt \right|^2 =$$

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目 (06JJ50108); 湖南省教育厅科学研究资助项目 (08C459)

作者简介: 龙 海 (1976-), 男, 讲师, 硕士研究生, 主要从事光纤通信及光网络的研究工作。

\* 通讯联系人。E-mail: lilichen12@126.com

收稿日期: 2007-09-10 收到修改稿日期: 2008-03-11

$$\left| \gamma \int f(t - \Delta\tau) \exp(j\omega t) dt + (1 - \gamma) \int f(t) \exp(j\omega t) dt \right|^2 = \left| \gamma \exp(j\omega \Delta\tau) \int f(t) \exp(j\omega t) dt + (1 - \gamma) \int f(t) \exp(j\omega t) dt \right|^2 = K(f) \left| \int f(t) \exp(j\omega t) dt \right|^2 \quad (1)$$

式中,比例因子  $K(f)$  的表示为:

$$K(f) = \left| \gamma \exp(j\omega \Delta\tau) + (1 - \gamma) \right|^2 = \left| \gamma [\cos(\omega \Delta\tau) + j\sin(\omega \Delta\tau)] + (1 - \gamma) \right|^2 = 1 - 4\gamma(1 - \gamma) \sin^2(\pi f \Delta\tau) \quad (2)$$

式中,与 PMD 有关的参量  $\Delta\tau$  和  $\gamma$  只包含在  $K(f)$  中,在无高阶 PMD 的情况下,它与基带功率谱  $\left| \int f(t) \exp(j\omega t) dt \right|^2$  是完全分开的。若频率  $f = f_c$  Hz 其中  $f_c$  是滤波器的工作频率,由滤波器或相应的器件滤出并测其强度,则与  $\Delta\tau$  和  $\gamma$  的关系表示成  $K(f_c)$ 。由于 (2) 式是代表光波形的普遍公式  $F(t)$ , 利用  $K(f_c)$  可以检测 PMD 的变化,它与调制系统的码型 (NRZ 或 RZ) 或者由于色散、非线性等效效应造成的波形变化无关。 $K(f)$  与参量  $\Delta\tau$  和  $\gamma$  的数值关系如图 1 所示,从

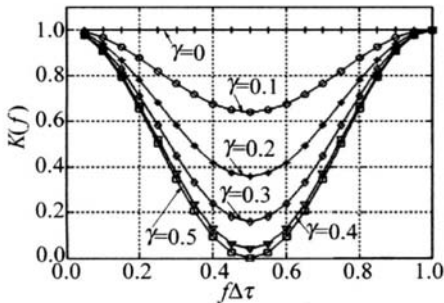


Fig 1  $K(f)$  change with  $\Delta\tau$  and  $\gamma$

图中可以看出,在  $f\Delta\tau < 0.5$  时,随着 DGD 的增大,  $K(f)$  值单调减小,过了 0.5 以后,其值又开始上升,在 DGD 一定的情况下,随着光强分束比的增加,  $K(f)$  值单调减小。可见从 PMD 补偿应用的角度来看,应该选  $f\Delta\tau < 0.5$  的范围。从频率的角度来看,取两个频率分量  $f_1 < f_2$ , 则当  $f\Delta\tau = 0.5$  时,  $\Delta\tau_1 > \Delta\tau_2$ , 这说明频率分量越高,对 PMD 的灵敏度越高,但是  $K(f)$  单调变化的范围小,所以为了兼顾补偿的范围和补偿精度,可以采用多个频率分量组合的方式。

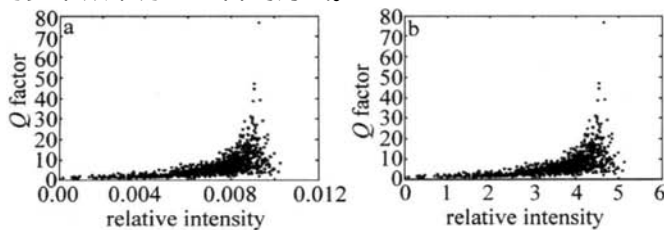


Fig 3 a—Q factor versus 10GHz component b—Q factor versus 20GHz component c—Q factor versus combined frequency component d—Q factor versus 40GHz component

### 1.2 电带宽信号与 PMD 的关系

电带宽作反馈信号,必须能够反映出 PMD 对信号的影响。下面研究平均 DGD 一定的条件下, PMD 统计特性引起的电带宽信号的变化。作者研究的是 40Gbit/s 的 NRZ 码的系统,码长度为  $2^7 - 1$ , PMD 模拟器采用文献 [9] 中所述的模型,平均 DGD 取一个比特周期,即为 25ps。5GHz 与 40GHz 分量的相对强度随 DGD 的变化,结果如图 2 所示。图中 PMD 即为 DGD 的统计平均值。

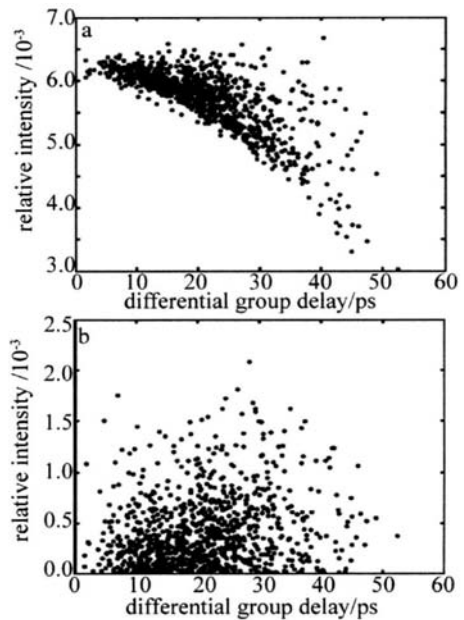
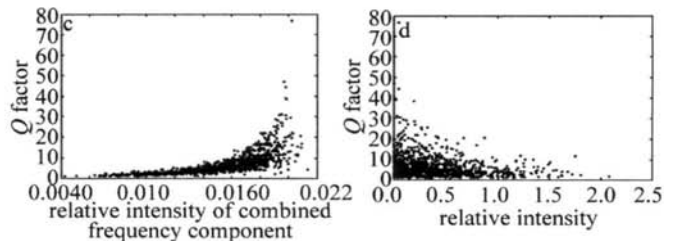


Fig 2 a—the relative intensity of 5GHz z b—the relative intensity of 40GHz z

从图 2 可以看出,各个频率分量的强度与 DGD 的关系并不是如图 1 那样所示具有清楚的线,而是有一定的统计分布的点,这是由于图 1 只考虑了 1 阶偏振模色散的影响,而图 2 除了 1 阶偏振模色散外还有高阶偏振模色散的影响。因此,由于高阶偏振模色散的影响,各频率分量的功率并不是随 PMD 的增大而增加,在采用反馈方式的 PMD 补偿中,即使是补偿算法搜索到最大功率值,也不能保证 PMD 得到补偿。从图 2a 到图 2b 比较还可以看出,较低频率分量的统计点相对集中,受高阶 PMD 影响较少,而随着频率分量的增高,统计点趋向均匀分散,受高阶 PMD 影响较大。

图 3 表示的是 Q 因子同各种频率强度的关系,因



为  $Q$  因子是与误码率联系在一起的,所以图 3 表示了频率分量的强度和误码率的相关性。在频率分量强度小的情况下, $Q$  因子也小,随着强度增大, $Q$  因子也有大有小,这也可以归结为 1 阶 PMD 以外因素的影响。

从图 3 分析来看,电带宽作反馈信号在高阶 PMD 的效应较小时才有效,高阶 PMD 大时需要采用其它的反馈信号。

## 2 偏振度与 PMD 的关系

与电带宽作反馈信号一样,偏振度作为反馈信号也必须能够反映出 PMD 对信号的影响。为了与电带宽进行比较,计算了在平均 DGD 一定、输入光的偏振态固定的条件下,PMD 统计特性引起的 DOP 的变化。偏振度的基本理论在文献 [10] 中已有论述,这里不再详述。作者所研究的是 40Gbit/s 的 NRZ 码和脉宽为 8ps 的 RZ 码系统,码长度为  $2^7 - 1$ ,PMD 模拟器采用文献 [9] 中的模型,平均 DGD 取一个比特周期,即为 25ps

图 4a 和图 4b 为 NRZ 和 RZ 码的在不同分光比下 DOP 随着 DGD 的变化情况。由图 4 可知,RZ 码的 DOP

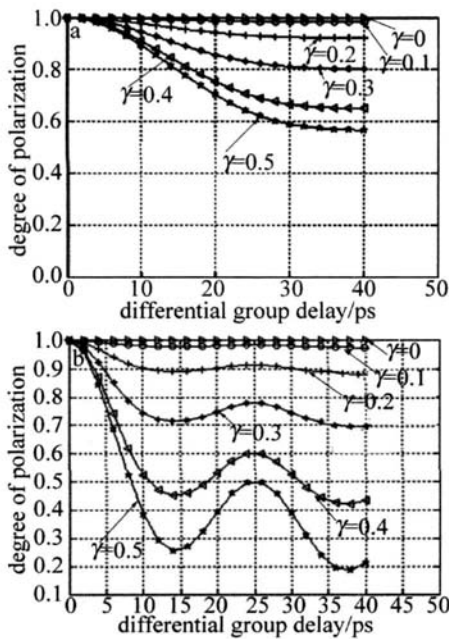


Fig 4 a—DOP versus DGD with different split ratio for NRZ b—DOP versus DGD with different split ratio for RZ

随着 DGD 的增大而下降的变化要比 NRZ 码的 DOP 下降快,同时,模拟结果证实了 DOP 与信号在 2 个主态上的分光比有关,只有当在两主态等功率激发的情况下,即分光比为 0.5 时,DOP 最小,这时 PMD 反应最灵敏。

图 5 是有高阶 PMD 时模拟器输出的 DOP 与 DGD 的关系,与图 4 比较并不呈线性关系,这是由于有高阶偏振模色散的影响。可以看出,由于高阶偏振模色散的影响,光信号的偏振态与 DGD 的关系变得复杂化。图 6 为考虑高阶 PMD 时,信号的 DOP 与  $Q$  值关系。

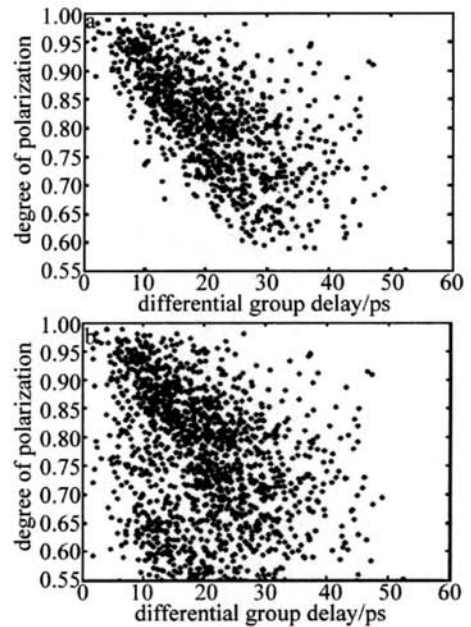


Fig. 5 a—DOP versus DGD for NRZ b—DOP versus DGD for RZ

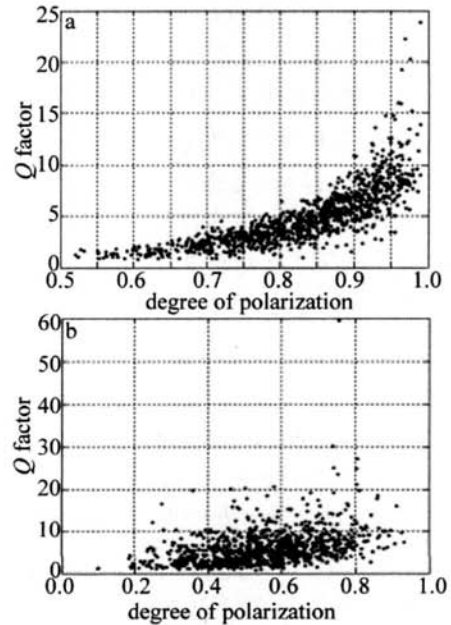


Fig. 6 a—DOP versus Q factor for NRZ b—DOP versus Q factor for RZ

一般是以  $Q > 7$  以上作为 PMD 对系统影响的标准,从图 6 来看,如果要达到这个标准,对于 NRZ 码而言,DOP 值在 0.97 以上;而对于 RZ 码而言,DOP 也得达到 0.85 以上,这与系统的高阶 PMD 有很大的关系。但是还必须看到,即便是高的 DOP 值也有极少数点的  $Q$  值很低,这是由于高阶 PMD 的影响。

以上分析说明,要有效地补偿高阶偏振模色散,一是要降低高阶偏振模色散对 DOP 的影响,另一个是要开发出有效的算法,能快速有效地搜索到高的 DOP 值。要补偿高阶 PMD,必须采用多段 PMD 补偿器以最大限度地补偿高阶偏模色散。一般对于补偿到 2 阶偏振模色散,采用 3 段 PMD 补偿器就可以了。3 段偏

模色散补偿器如图 7所示, 只要调节 3个偏振控制器

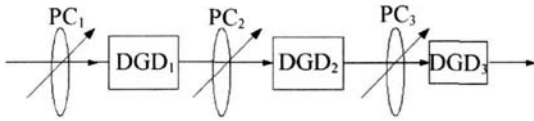


Fig 7 Three section PMD modulator PC—polarization controller; DGD—produced by polarization depend delay lines

以及任意一段差分群时延的大小, 即可对 1阶及 2阶 PMD 进行有效地补偿。偏振控制器及群时延的控制信号来自于从光纤线路中测量得到的偏振度或电功率信号, 从而驱动偏振控制器和群时延使得测量的偏振度达到最优, 即可认为 1阶及 2阶 PMD 得到补偿。

### 3 结 论

分别讨论了 DOP和电带宽作为反馈信号的性能, 从性能上讲, 2种反馈信号都随 1阶 PMD 变化而具有线性变化, 当系统中有高阶偏振模色散时, 二者均不具有线性的变化。在有高阶 PMD 存在时, 电带宽作为反馈信号明显反映不了 PMD 的变化。这充分说明了偏振度作为反馈信号对于搜索算法是有利的, 可以减少搜索时间, 从而提高补偿的速度。

从设备的复杂度来看, 低速系统 (10Gbit/s)用电带宽作反馈信号比较经济, 当速率提高到 40Gbit/s时, 电器件的成本迅速提高, 电带宽作反馈信号显然不经济, 由于 DOP信号本身以及 DOP采集设备与码速率无关, 这时用 DOP法比较合适, 容易实现系统的升级。

### 参 考 文 献

- [1] LIU J F, YU J L, WANG J. Study on automatic compensation of first order PMD in high speed optical fiber communication systems [J]. Journal on Communications 2003, 24(12): 146-150 (in Chinese).
- [2] WANG G, LIK, FAN M. Study of characteristics of polarization mode dispersion in single mode fibers with elliptical birefringence [J]. Laser Technology, 2006 30(5): 465-468 (in Chinese).
- [3] MA L L, LI G H. Polarized light expressed by Poincaré sphere [J]. Laser Technology, 2003 27(4): 302-303 (in Chinese).
- [4] WANG J J, PAN Sh L, JIA J *et al*. PMD compensation based on a new type dynamic first order PMD compensator [J]. Chinese Optics Letters 2006 4(4): 202-204 (in Chinese).
- [5] ZHANG J Y, CHEN M H, ZHANG Q. An adaptive PMD compensation experiment in 40Gbit/s CSRZ system [J]. Journal of Optoelectronics • Laser 2006, 17(9): 1092-1095 (in Chinese).
- [6] GORDON J P, KOGELN K H. PMD fundamentals polarization mode dispersion in optical fibers [J]. Proceeding of the National Academy of Sciences of the USA, 2000, 97(2): 4541-4550
- [7] POOLE C D, WAGNER R E. Phenomenological approach to polarization dispersion in single mode fibers [J]. Electron Lett 1986 22(19): 1029-1030
- [8] KHOSRAVANI R, RAVSTAD S A, SONG S A, *et al*. Polarization mode dispersion compensation in WDM systems [J]. IEEE Photonics Technology Letters 2001, 13(12): 1370-1372
- [9] LI Ch L, ZHENG Y, LI Ch Y, *et al*. A simple practical and low-loss PMD emulator [J]. High Technology Letters 2003(8): 19-21 (in Chinese).
- [10] LONG H, CHEN L, HEW H. Influence of high order PMD on DOP of NRZ and RZ in high rate optical communication [J]. Science Technology and Engineering 2007, 7(16): 4040-4043 (in Chinese).
- [5] WANG P X. Engineering study on heat and mass transfer of projects [M]. Beijing Science Press 1982 35-37 (in Chinese).
- [6] PENG X Y, ASUND IA, CHEN Y H. Study of the mechanical properties of Nd:YVO<sub>4</sub> crystal by use of laser interferometry and finite element analysis [J]. Appl Opt 2001, 40(9): 1396-1403
- [7] SHI P, LI L, GAN A Sh *et al*. Research on thermal distortion of Nd:GdVO<sub>4</sub> crystal with laser diode end pumped circular section [J]. Chinese Journal of Lasers 2006 33(10): 1324-1328 (in Chinese).
- [8] YANG H R, ZUO T Ch. Investigation on thermal effects and output of all-solid-state in miniature Yb:YAG laser [J]. Acta Photonica Sinica 2003 32(8): 907-909 (in Chinese).

(上接第 644页)

### 参 考 文 献

- [1] LIU Y, LI Zh J, WU Q B. Research of technical parameters of Nd:YAG laser scribing silicon film surface cell [J]. Laser Technology 2006 30(3): 248-251 (in Chinese).
- [2] LU Y B, QING G B, LAN G. LD side pump Er glass lasers [J]. Laser Technology 2006, 30(3): 329-332 (in Chinese).
- [3] YE Y C, LIN W X, WANG G F. Study on LD-pumped Nd:KGW thin-disk laser [J]. Laser Technology 2006 30(5): 537-538 (in Chinese).
- [4] WU Ch Zh, WANG Zh Y. Laser physics [M]. Shanghai Fudan University Press 1987 78-79 (in Chinese).